



## بررسی تجربی و عددی وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای فلزی تحت ضربه محوری

رضا رجبیه‌فرد<sup>1</sup>، ابوالفضل درویشه<sup>2\*</sup>، مجید علی طاوولی<sup>3</sup>، رضا انصاری<sup>3</sup>، المیرا مقدوری<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت

\* رشت، صندوق پستی 3756-41635، adarvizeh@guilan.ac.ir

### چکیده

مقاله حاضر به بررسی تجربی و عددی فرآیند وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای فلزی تحت بارگذاری محوری دینامیکی می‌پردازد. تست‌های تجربی بر روی پوسته‌هایی از جنس فولاد در دستگاه پرتابگر گازی انجام شده و با استفاده از سیستم اندازه‌گیری بارهای ضربه‌ای، نیروی لازم برای وارونگی داخلی بدست آورده می‌شود. همچنین تحلیل عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام گرفته و دقت این مدل‌ها با نتایج تجربی سنجیده شده است. در این مقاله پارامترهای هندسی قالب و پوسته‌ها ثابت در نظر گرفته شده و تاثیر سرعت و جرم پرتابه بر میزان کوتاه‌شدگی و جذب انرژی پوسته‌هایی که در فرآیند وارونگی داخلی تحت ضربه محوری قرار گرفته‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور پرتابه با سرعت‌ها و جرم‌های مختلف به سمت نمونه پرتاب می‌شود. مشاهده می‌شود که در صورت ثابت ماندن جرم پرتابه، افزایش سرعت تاثیر چندانی بر نیروی ثابت وارونگی نداشته و تنها میزان جابه‌جایی پوسته را افزایش می‌دهد اما اگر سرعت پرتابه ثابت بماند، افزایش جرم پرتابه علاوه بر افزایش جابه‌جایی پوسته، منجر به افزایش نیروی ثابت وارونگی می‌گردد. مقایسه نتایج بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی، تطابق خوبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 دی 1394

پذیرش: 01 اسفند 1394

ارائه در سایت: 24 اسفند 1394

کلیدواژه‌ها:

وارونگی داخلی

ضربه محوری

دستگاه پرتابگر گازی

پوسته‌های استوانه‌ای

## Experimental and numerical investigation of internal inversion of metallic cylindrical shells under axial impact

Reza Rajabiehfar<sup>1</sup>, Abolfazl Darvizeh<sup>2\*</sup>, Majid Alitavoli<sup>1</sup>, Reza Ansari<sup>1</sup>, Elmira Maghdouri<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology & Higher Education, Rasht, Iran

\*P.O.B. 3756-41635, Rasht, Iran, adarvizeh@guilan.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 December 2015  
Accepted 20 February 2016  
Available Online 14 March 2016

Keywords:  
Internal inversion  
Axial impact  
Gas gun  
Cylindrical shells

### ABSTRACT

In this paper, the internal inversion process of metallic cylindrical shells under dynamic axial loading is investigated experimentally and numerically. Experimental tests are performed on the steel tubes in a gas gun and the required force for internal inversion is obtained using the measurement system of impact loadings. Also, numerical analysis is carried out by the finite element software ABAQUS and the accuracy of simulated models is validated with the experimental results. In this paper, all geometrical properties of the tubes and die are assumed to be constant and the effect of the projectile mass and velocity is investigated on the shortening and energy absorption of the tubes which are affected by axial impact in the internal inversion process. Therefore the projectile is shot directly to the specimen with different masses and velocities. It is observed that if the projectile mass remains constant, increased impact velocity has almost no effect on the constant inversion load and just increases the tube displacement but if the impact velocity remains constant, increasing the amount of projectile mass causes increase in the constant inversion load besides increased tube displacement. Comparing the results of numerical simulations with the experimental results shows a good agreement between them.

### 1- مقدمه

قطعات می‌شود. این نوع جاذب‌های انرژی برگشت ناپذیر هستند و بعد از تغییر شکل دیگر قابل استفاده نمی‌باشند. اکثر جاذب‌های انرژی یکبار مصرف هستند؛ یعنی پس از یکبار تغییر شکل پلاستیک دور انداخته می‌شوند. سازه‌های پوسته‌ای یکی از محبوب‌ترین سیستم‌های جذب انرژی می‌باشند که دارای کاربرد فراوان در صنایع هوافضا، سازه‌های دریایی، خودروسازی، سد-های بزرگ، سقف‌های پوسته‌ای، خطوط لوله‌کشی، سازه‌های حمل و نقل

در بسیاری از سیستم‌های مهندسی، به خصوص در سیستم‌های متحرک برای جلوگیری از خسارت یا کاهش آن از سیستم‌های جذب انرژی استفاده می‌شود. جاذب‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی استفاده می‌شوند. انرژی جنبشی صرف غلبه بر اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک و یا شکست در

Please cite this article using:

R. Rajabiehfar, A. Darvizeh, M. Alitavoli, R. Ansari, E. Maghdouri, Experimental and numerical investigation of internal inversion of metallic cylindrical shells under axial impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 295-304, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قطار تحت ضربه با زوایای مختلف با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ال اس داین<sup>2</sup> مورد بررسی قرار دادند. نیک‌نژاد و معینی‌فرد [12] مدلی تحلیلی برای تخمین نیروی وارونگی خارجی شبه‌استاتیکی در کل طول فرآیند ارائه دادند و نتایج بدست آمده را با تست‌های تجربی مقایسه نمودند.

تحقیقات صورت گرفته در زمینه فرآیند وارونگی داخلی اغلب در حوزه فرآیندهای شبه‌استاتیکی بوده و تاکنون در پژوهش‌های دینامیکی، اثر پارامترهای موثر بر ضربه که شامل سرعت و جرم پرتابه می‌باشند، بر مکانیزم تغییر شکل وارونگی داخلی و میزان اثر آن‌ها بر نیروی وارونگی بررسی نگردیده است. بنابراین در این تحقیق ضمن در نظر گرفتن شرایط دینامیکی، تاثیر سرعت و جرم پرتابه بر فرآیند مذکور در دستگاه پرتابگر گازی<sup>3</sup> به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌ها تحت ضربه پرتابه‌ای با جرم‌ها و سرعت‌های مختلف قرار می‌گیرند و با استفاده از سیستم اندازه‌گیری بارهای ضربه‌ای، نیروی لازم برای وارونگی داخلی بدست آورده می‌شود. همچنین توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>4</sup> فرآیند مذکور شبیه‌سازی می‌شود و سپس نتایج بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

## 2- مطالعه آزمایشگاهی

نحوه آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و قالب وارونگی داخلی مورد استفاده و همچنین تجهیزات مربوط به انجام فرآیند وارونگی در دستگاه پرتابگر گازی از جمله مراحل هستند که باید قبل از انجام آزمایش مورد بررسی قرار گیرند. شکل 1 نمایی از دستگاه پرتابگر گازی در موسسه آموزش عالی احرار رشت را نشان می‌دهد.

در هنگام انجام آزمایش، لوله‌های فولادی مورد نظر که از میان لوله‌های تجاری موجود در بازار تهیه شده‌اند، به همراه قالب در یک سمت و پرتابه در سمت دیگر دستگاه پرتابگر گازی قرار می‌گیرد. سپس با تنظیم فشار کپسول می‌توان پرتابه را با سرعت دلخواه به سمت نمونه پرتاب نمود. شکل 2 پرتابه و نحوه قرارگیری پوسته استوانه‌ای در ورودی قالب را نشان می‌دهد. پس از برخورد پرتابه به پوسته، نیروی وارد شده به پوسته توسط لودسل<sup>5</sup> اندازه‌گیری می‌شود. در واقع لودسل به کمک کرنش‌سنج‌هایی<sup>6</sup> که در درون آن نصب شده، تغییر ولتاژ ناشی از ضربه را اندازه‌گیری می‌نماید. سپس ولتاژ اندازه‌گیری شده برحسب زمان توسط یک تقویت‌کننده<sup>7</sup> تقویت شده و نهایتاً منحنی ولتاژ برحسب زمان در یک منبع ذخیره‌ساز دیجیتالی به نام اسیلوسکوپ<sup>8</sup> نمایش داده می‌شود. شایان ذکر است بعد از کالیبره نمودن لودسل، هر یک میلی‌ولت برابر 63.183 نیوتن می‌باشد که می‌توان با استفاده از این ضریب پاسخ‌های ولتاژ-زمان را به نیرو-زمان تبدیل نمود. شکل 3 دستگاه اسیلوسکوپ و تقویت‌کننده موجود در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

همچنین به منظور وارونگی بهتر پوسته در درون قالب باید ضریب اصطکاک بین سطح خارجی پوسته و سطح داخل قالب را به حداقل رساند لذا از گریس‌های موجود در بازار به عنوان یک ماده روان‌ساز در سطح تماس پوسته و قالب استفاده شده است و همچنین سطح خارجی پوسته و سطح داخل قالب برای هر آزمایش با سمباده 800 صیقل کاری شده‌اند.

سیالات و ... می‌باشند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم، مقاومت زیاد و راحتی ساخت، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع دارند به طوری که عوامل ذکر شده و همچنین صرفه اقتصادی این نوع از جاذب‌های انرژی سبب بررسی رفتار این سازه‌ها تحت انواع مختلف بارگذاری در سال‌های متمادی شده است. پوسته‌های استوانه‌ای یکی از انواع سازه‌های پوسته‌ای هستند که با مشخصات هندسی ضخامت، شعاع و طول توصیف می‌شوند و به صورت گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند که یکی از مهم‌ترین موارد، استفاده از آن‌ها به عنوان جاذب‌های انرژی است. جاذب‌های انرژی به شکل‌های مختلف مانند پوسته‌های پیش شکل‌دهی شده [2،1] و پوسته‌های مخروطی و استوانه‌ای [4،3] مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل اهمیت پوسته‌های استوانه‌ای در صنعت، مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی این سازه‌ها مورد توجه می‌باشد که در این میان، تحلیل رفتار دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای از اهمیت فراوانی برخوردار است.

یکی از انواع فرآیندهای جذب انرژی، وارونگی به داخل یا خارج پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده با مواد نسبتاً نرم است که برخی از کاربردهای آن استفاده در ضربه‌گیرها و فرآیندهای شکل‌دهی می‌باشد. فرآیند وارونگی اعم از داخلی و خارجی، توسط محققان زیادی به صورت تئوری، عددی و تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. گوئیست و ماربل [5] یک مدل تحلیلی جهت یافتن نیروی وارونگی خارجی در لوله‌های استوانه‌ای فلزی جدار نازک ارائه دادند. خطای مدل تحلیلی ارائه شده توسط گوئیست و ماربل در مقایسه با نتایج تجربی در حدود 10 الی 30 درصد بدست آمد. کار انجام شده از جمله کارهای اولیه در زمینه این نوع تغییر شکل بوده و پایه بسیاری از تحقیقات در زمینه مذکور قرار گرفته است. الحسنی و همکاران [6] بر روی فرآیند وارونگی داخلی و خارجی با استفاده از قالب کار نمودند. آن‌ها علاوه بر انجام تست‌های وارونگی به صورت شبه‌استاتیکی و دینامیکی (دستگاه سقوط آزاد جرم<sup>1</sup>)، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی نیروی ثابت در فرآیند وارونگی خارجی شبه‌استاتیکی با استفاده از قالب ارائه دادند. همچنین مواردی از قبیل تغییرات ضخامت پوسته استوانه‌ای شکل حین وارونگی، تاثیر شعاع و زاویه‌ی قالب و همچنین تاثیر نرخ تغییر شکل (نرخ تراکم) بر فرآیند مذکور در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. ردی [7] مدلی تحلیلی برای تخمین نیروی ثابت در فرآیند وارونگی خارجی شبه‌استاتیکی ارائه نمود که اساس آن مدل تحلیلی گوئیست و ماربل بود. سپس نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج تجربی مقایسه شدند. رید و هریگان [8] مطالعاتی بر روی فرآیند وارونگی داخلی با استفاده از قالب هم به صورت عددی و هم به صورت تحلیلی و تجربی انجام دادند. این مطالعات به صورت شبه‌استاتیکی و دینامیکی صورت گرفتند و نتایج با هم مقایسه شده است. آن‌ها در این مقاله توانستند با استفاده از اصل پایستگی انرژی، رابطه‌ای را برای تخمین نیروی ثابت در فرآیند وارونگی داخلی دینامیکی ارائه دهند. رزا و همکاران [9،10] فرآیندهای وارونگی داخلی و خارجی شبه‌استاتیکی را بر روی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک فلزی با استفاده از قالب به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این مقاله تاثیر هندسه پوسته و قالب را نیز بر فرآیند وارونگی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که نسبت شعاع قالب به شعاع پوسته، شرایط اصطکاکی بین قالب و پوسته و همچنین طول ورودی قالب نقش مهمی را در ایجاد یک تغییر شکل وارونگی مناسب ایفا می‌نماید. حسینی و حسینی‌تهرانی [11] فرآیند وارونگی خارجی را در ضربه‌گیرهای

1- Drop Hammer

2- LS-DYNA  
3- Gas Gun  
4- Abaqus  
5- Load Cell  
6- Strain Gauge  
7- Amplifier  
8- Oscilloscope

به صورت روش صریح<sup>1</sup> شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین پوسته، قالب و پرتابه به صورت اجسام شکل‌پذیر<sup>2</sup> و جامد<sup>3</sup> شبیه‌سازی گردیده اما پس از چیدمان قطعات در مازول مربوطه، با استفاده از محدودیت<sup>4</sup> ایجاد شده، قالب و پرتابه به عنوان جسم صلب<sup>5</sup> در نظر گرفته می‌شوند. نوع المان به کار رفته در مش- بندی C3D8R و اندازه دانه‌بندی مش‌ها به منظور استقلال حل عددی از مش‌بندی و همگرا شدن جواب‌ها، 0.00035 در نظر گرفته شده است. با توجه به اندازه مش ذکر شده، تعداد المان‌های مش برای پوسته، 158760 عدد بدست آمد. تماس بین کلیه سطوح به صورت تماس عمومی<sup>6</sup> در نظر گرفته شده است. لحظه برخورد پرتابه به پوسته در حالی که پوسته در ورودی قالب قرار گرفته است شبیه‌سازی شده و در شکل 4 نشان داده شده است.

#### 4- بحث و بررسی نتایج

در این بخش اثر سرعت پرتابه و جرم آن بر فرآیند وارونگی داخلی دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج مدل عددی به کمک نتایج تجربی صحه‌سنجی می‌گردند. کلیه نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش از جنس فولاد می‌باشند و قطر داخلی، ضخامت اولیه و طول پوسته- های استوانه‌ای مورد آزمایش به ترتیب 28.2، 1.2، 50 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله‌های فولادی، آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام<sup>7</sup> در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشاء انجام شده و منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی ماده در شکل 5 نمایش داده شده است. چگالی، مدول یانگ و نسبت پواسون برای پوسته‌های فولادی به ترتیب 7939 کیلوگرم بر متر مکعب، 200 گیگاپاسکال و 0.3 در نظر گرفته شده است. با توجه به حساس بودن رفتار پلاستیک مواد فولادی به نرخ بارگذاری، می‌توان به کمک رابطه کوپر-سیموند<sup>8</sup> (رابطه 1) تنش تسلیم دینامیکی فولاد را به ازای هر نرخ کرنش دلخواه بدست آورد. ضرایب ثابت D و q در رابطه کوپر- سیموند برای فولاد به ترتیب 40.4 و 5 می‌باشند [13]. سپس می‌توان از تنش تسلیم دینامیکی بدست آمده در شبیه‌سازی فرآیند وارونگی دینامیکی در نرم‌افزار آباکوس استفاده نمود.

$$\frac{Y_d}{Y_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (1)$$



Fig. 4 Sectioned tube and die when the striking projectile impact the tube in Abaqus

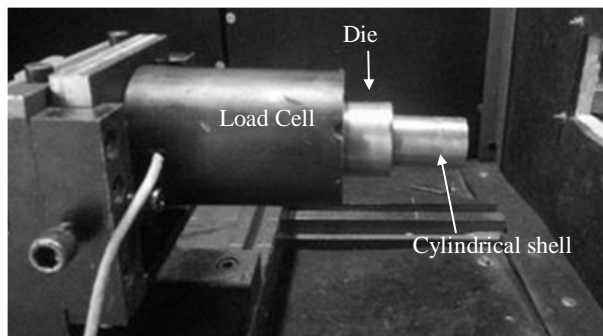
شکل 4 نمایشی برش خورده از پوسته استوانه‌ای به همراه قالب در لحظه برخورد پرتابه در آباکوس

- 1- Explicit
- 2- Deformable
- 3- Solid
- 4- Constraint
- 5- Rigid Body
- 6- General Contact
- 7- SANTAM
- 8- Cowper-Symond



Fig. 1 Total view of Gas Gun

شکل 1 نمایش کلی از دستگاه تفنگ گازی



(a) الف



(b) ب

Fig. 2 a) Cylindrical shell at the die inlet, b) Striking mass

شکل 2 (الف) نحوه قرارگیری پوسته استوانه‌ای در ورودی قالب، (ب) پرتابه

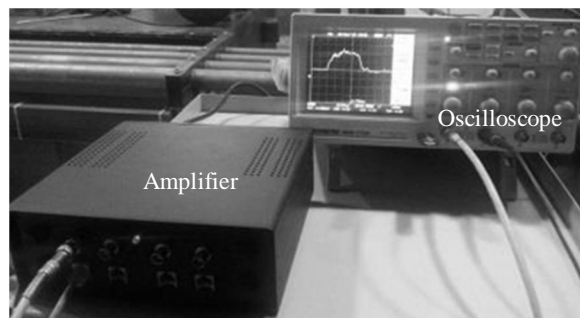


Fig. 3 The oscilloscope and the amplifier

شکل 3 دستگاه اسیلوسکوپ و تقویت‌کننده

#### 3- شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر بارگذاری محوری دینامیکی استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی فرآیند ضربه، پرتابه و یک صفحه صلب مدل گردیده و سپس نمونه و قالب پس از مدل شدن، در مازول چیدمان قطعات بین آن‌ها قرار گرفته‌اند. در تحلیل دینامیکی تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای در فرآیند وارونگی داخلی در نرم‌افزار آباکوس، سازه‌ها

**جدول 1** مقادیر تجربی و عددی کوتاه شدگی و انرژی جذب شده توسط پوسته‌ها در فرآیند وارونگی داخلی (جرم پرتابه 264 گرم)

**Table 1** Experimental and numerical results of tube shortening and absorbed energy in the internal inversion process ( $m=264\text{gr}$ )

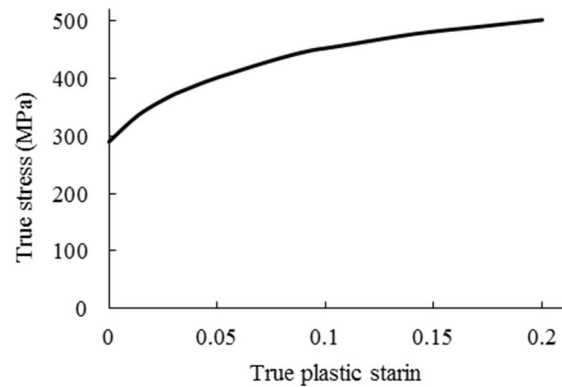
سرعت پرتابه (m/s)	کوتاه‌شدگی پوسته‌ها (mm)		انرژی جذب شده (J)	
	تجربی	رابطه (2)	تجربی	عددی
71	12.8	14.05	648.4	641.3
81	15.6	16.28	827.1	809.1
89	17	18.23	1029.7	1030.1
97	19.4	21.08	1222.5	1197.9
104	21.7	23.56	1402.8	1336.9
110.5	24	25.93	1604.9	1511.6
126.5	30	30.35	1985.8	1896.4

کوتاه‌شدگی پوسته نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه در شکل 7 نیز که نمونه‌های برش خورده را به ازای سرعت‌های مختلف ضربه نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود. به منظور درک بهتر فرآیند وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای، مراحل مختلف این فرآیند به صورت شماتیک در شکل 8 نمایش داده شده است که در آن فرآیند وارونگی به چهار مرحله تقسیم شده است. در پایان مرحله اول (شکل 8-a) انتهای آزاد پوسته به نقطه B می‌رسد سپس در پایان مراحل دوم و سوم فرآیند (شکل‌های 8-b و 8-c)، انتهای آزاد پوسته به ترتیب در نقاط C و D قرار می‌گیرد. در طی این مراحل نیروی لازم برای وارونگی افزایش می‌یابد اما پس از رسیدن به نقطه D، پوسته استوانه‌ای فقط درون قالب سر می‌خورد و نیروی وارونگی در مرحله چهارم فرآیند (شکل 8-d) تقریباً ثابت مانده و تغییر نمی‌نماید. همان‌طور که در شکل‌های شماتیک مشاهده می‌شود، انتهای آزاد پوسته در طی مراحل وارونگی، جابه‌جایی زاویه‌ای تقریبی 270 درجه داشته است [9,6] که این مساله در نمونه‌های برش خورده در شکل 7 نیز قابل مشاهده است. همچنین لازم به ذکر است که ضخامت پوسته در طی فرآیند وارونگی داخلی تغییر می‌نماید. جدول 2 مقدار ضخامت پوسته در نقاط A، B، C و D را که در شکل 8 نشان داده شده‌اند، به صورت عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ضخامت پوسته از نقطه A تا نقطه C افزایش یافته و از نقطه C به نقطه D کاهش می‌یابد. همچنین مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که پس از اتمام فرآیند وارونگی، ضخامت و قطر قسمت وارونه نشده پوسته کمی افزایش می‌یابد.



**Fig. 7** Internally inverted sectioned tubes at different velocities (respectively from left to right,  $v=71, 81, 89, 97, 104, 110.5$  &  $126.5$  m/s)

**شکل 7** نمای برش خورده از لوله‌هایی که به سمت داخل وارونه شده‌اند (به ترتیب از چپ به راست سرعت پرتابه برابر است با 71, 81, 89, 97, 104, 110.5 و 126.5 متر بر ثانیه)



**Fig. 5** True stress-true plastic strain curve for the tube material

**شکل 5** منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی برای لوله فولادی

قالب مورد استفاده در فرآیند وارونگی داخلی دارای شعاع 3 میلی‌متر بوده و جنس آن از فولاد VCN150 (AISI4340) سخت‌کاری شده می‌باشد. همچنین به منظور قرارگیری نمونه در قالب مطابق با شکل 2-a، طول ورودی قالب 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پرتابه مورد استفاده در آزمایش نیز از جنس قالب بوده و جداره بیرونی آن با ارتالون پوشیده شده است تا در داخل لوله پرتابگر گازی به راحتی شلیک شود.

#### 1-4- اثر سرعت پرتابه بر فرآیند وارونگی داخلی

در این بخش پرتابه‌ای به جرم 264 گرم با سرعت‌های مختلف (مطابق با جدول 1) به سمت پوسته‌ای که در دهانه قالب واقع شده، شلیک می‌شود و پوسته پس از جذب انرژی جنبشی پرتابه، در درون قالب مطابق با شکل 6 وارونه می‌گردد. میزان انرژی جذب شده و طول کوتاه‌شدگی پوسته‌ها به ازای سرعت‌های مختلف پرتابه در جدول 1 آورده شده و نتایج در دو حالت تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه می‌گردند. لازم به ذکر است که به منظور تایید نتایج تجربی، هر کدام از تست‌ها دو بار تکرار شده‌اند.

در تست‌های آزمایشگاهی برای بدست آوردن منحنی نیرو-جابه‌جایی و در نتیجه محاسبه میزان انرژی جذب شده توسط پوسته در حالت تجربی به مقادیر جابه‌جایی نیاز است که می‌توان آن را از رابطه (2) بدست آورد [14].

$$\delta = V_0 t - \frac{1}{m} \iint F dt dt \quad (2)$$

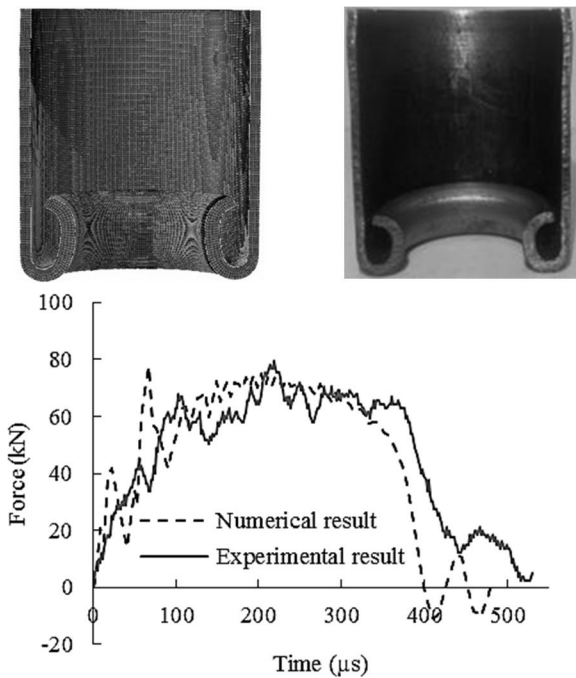
که در آن  $V_0$ ،  $m$  و  $F$  به ترتیب سرعت پرتابه در لحظه برخورد، زمان، جرم پرتابه و نیروی وارد شده به پوسته در لحظه  $t$  می‌باشند. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول 1 مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پرتابه، میزان



**Fig. 6** Sectioned invertube on its respective die

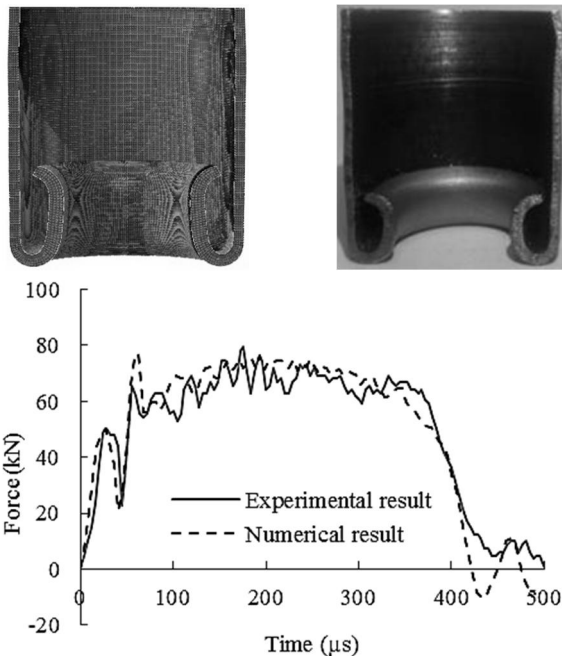
**شکل 6** نمایی برش خورده از لوله وارونه شده در درون قالب مربوطه

نتایج بدست آمده از فرآیندهای مدل شده در آباکوس با یکدیگر مقایسه می‌گردند. سپس در شکل 16 منحنی‌های نیرو-زمان به ازای سه سرعت 81، 97 و 110.5 متر بر ثانیه در حالت تجربی با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



**Fig. 10** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=81\text{m/s}$

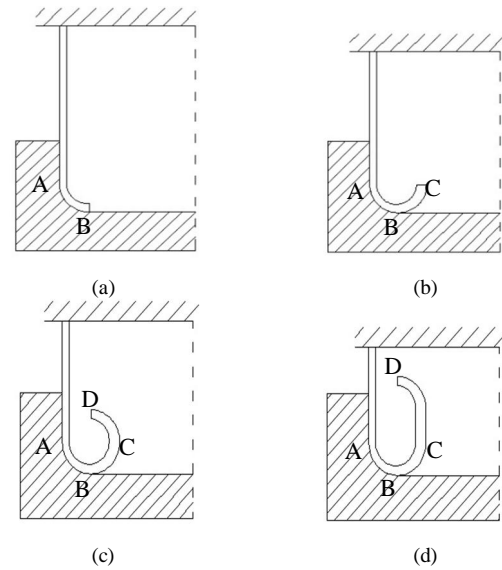
شکل 10 منحنی نیرو-زمان و شکل نهایی لوله بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 81 متر بر ثانیه



**Fig. 11** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=89\text{m/s}$

شکل 11 منحنی نیرو-زمان و شکل نهایی لوله بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 89 متر بر ثانیه

پوسته‌های تغییر شکل یافته و نمودار نیرو-زمان به ازای سرعت‌های مختلف پرتابه در شکل‌های 9 تا 15 نشان داده می‌شوند که در آن‌ها نتایج تجربی با



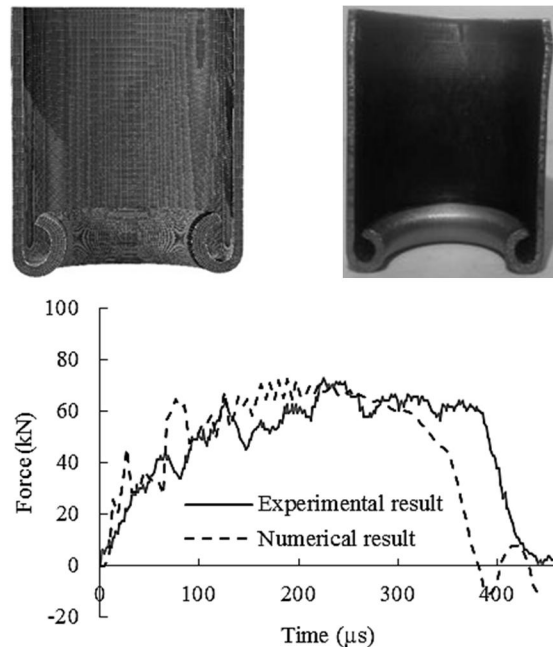
**Fig. 8** Stages of internal inversion process

شکل 8 مراحل فرآیند وارونگی داخلی

جدول 2 ضخامت پوسته در فرآیند وارونگی داخلی

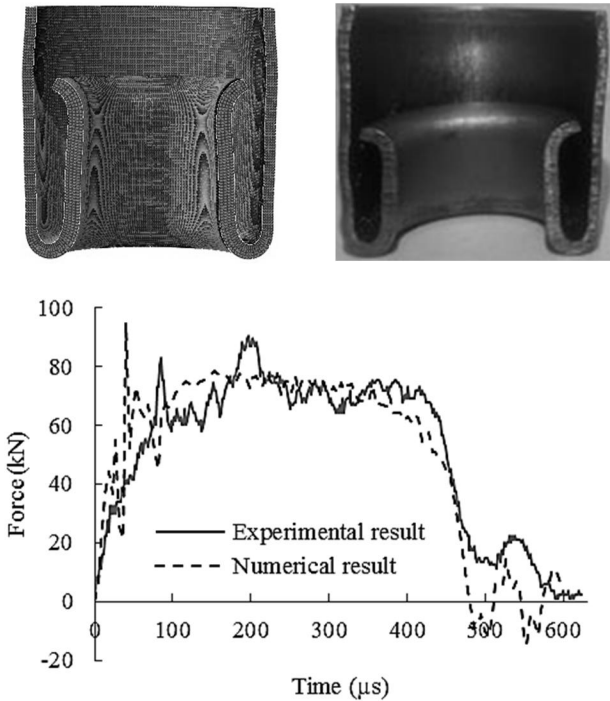
**Table 2** Tube thickness in the internal inversion process

ضخامت پوسته (mm)		نقاط مشخص شده بر روی لوله پس از وارونگی
عددی	تجربی	
1.2	1.3	A
1.5	1.65	B
1.77	1.85	C
1.36	1.4	D



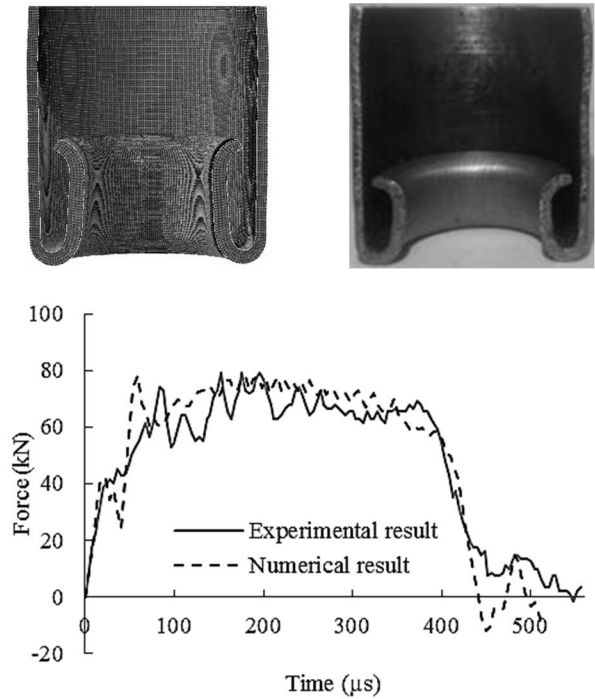
**Fig. 9** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=71\text{m/s}$

شکل 9 منحنی نیرو-زمان و شکل نهایی لوله بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 71 متر بر ثانیه



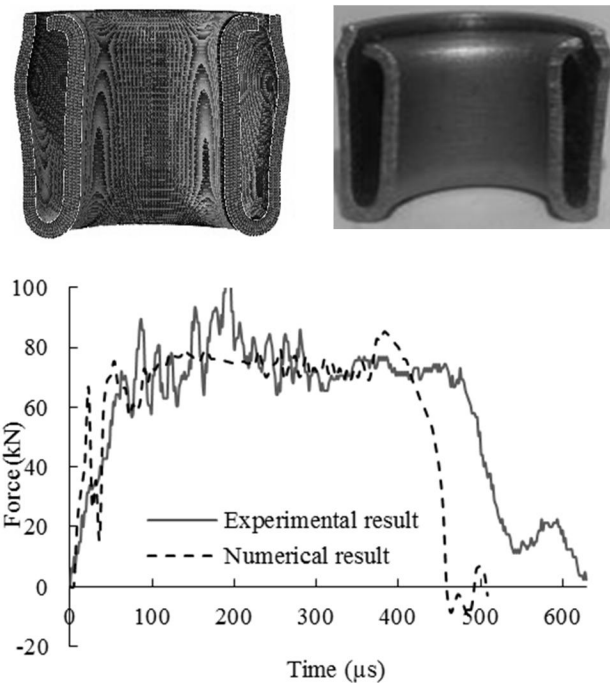
**Fig. 14** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=110.5\text{m/s}$

شکل 14 منحنی‌های نیرو-زمان و شکل نهایی لوله‌ها بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 110.5 متر بر ثانیه



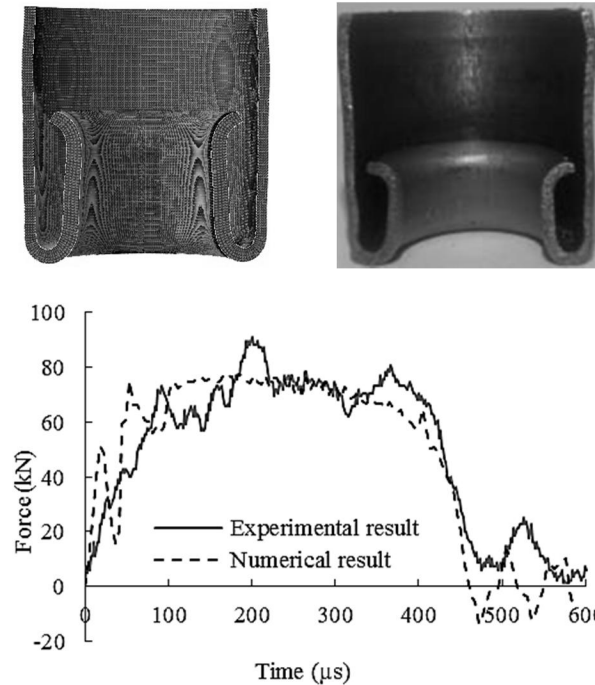
**Fig. 12** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=97\text{m/s}$

شکل 12 منحنی‌های نیرو-زمان و شکل نهایی لوله‌ها بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 97 متر بر ثانیه



**Fig. 15** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=126.5\text{m/s}$

شکل 15 منحنی‌های نیرو-زمان و شکل نهایی لوله‌ها بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 126.5 متر بر ثانیه

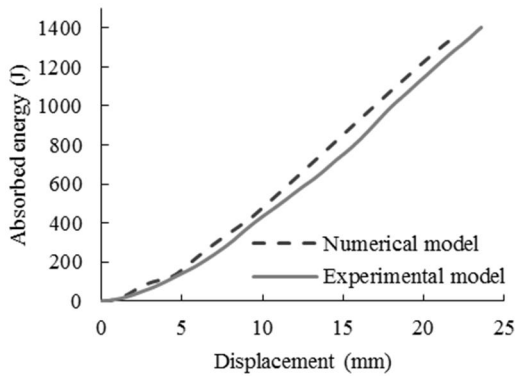


**Fig. 13** Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $m=264\text{gr}$  and  $v=104\text{m/s}$

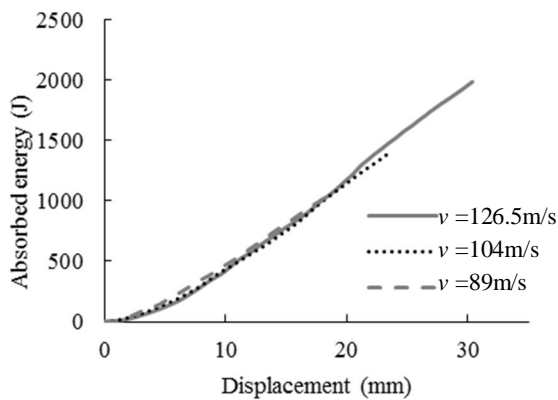
شکل 13 منحنی‌های نیرو-زمان و شکل نهایی لوله‌ها بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای جرم پرتابه 264 گرم و سرعت 104 متر بر ثانیه

هم در حالت عددی هر سه منحنی تقریباً بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و شیب یکسانی دارند و تنها تفاوتشان در میزان جابه‌جایی نهایی پوسته می‌باشد. این بدان معناست که اگر شرایط هندسی ثابت مانده و جرم پرتابه نیز تغییر نکند، پوسته برای وارونه شدن به یک مقدار معینی انرژی نیاز دارد به طوری که هرچه سرعت پرتابه بیشتر شود، مقدار انرژی باقی‌مانده صرف جابه‌جایی بیشتر پوسته می‌گردد.

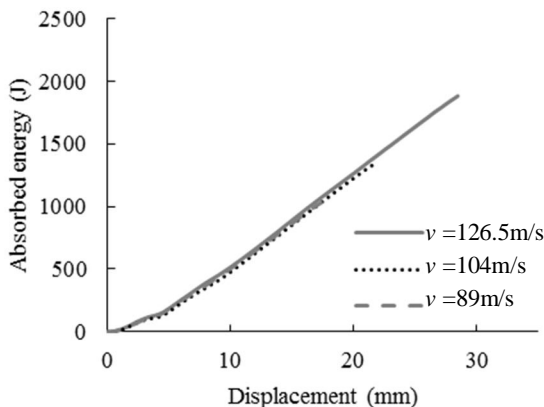
الف (a)



ب (b)

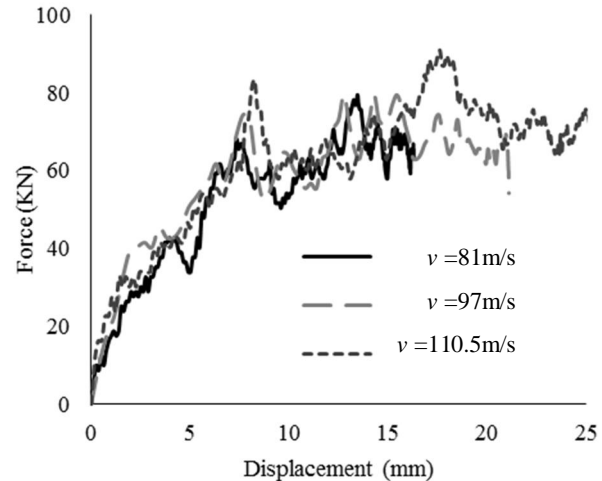


ج (c)



**Fig. 17** Absorbed energy-displacement curves for the internal inversion process of tubes, (a) comparison of experimental and numerical results for  $v=104$  m/s, (b) comparison of experimental results for three different velocities, (c) comparison of numerical results for three different velocities

شکل 17 منحنی‌های انرژی جذب شده برحسب جابه‌جایی در فرآیند وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای، (الف) مقایسه نتایج تجربی و عددی به ازای پرتابه‌ای با سرعت 104 متر بر ثانیه، (ب) مقایسه نتایج تجربی در سه سرعت مختلف، (پ) مقایسه نتایج عددی در سه سرعت مختلف



**Fig. 16** Comparison of force-displacement curves for the impact velocities of 81, 97 & 110.5 m/s and the striking mass 264 gr

شکل 16 مقایسه منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی تحت ضربه پرتابه‌ای با سرعت‌های 81، 97 و 110.5 متر بر ثانیه و جرم 264 گرم

همان‌طور که از شکل‌های 9 تا 15 مشاهده می‌شود، مدل‌های تجربی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. منحنی‌های نیرو-زمان بدست آمده در این شکل‌ها نشان می‌دهد که نیروی وارونگی دینامیکی از یک لحظه معین به بعد تقریباً ثابت می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، این لحظه همان لحظه-ایست که انتهای آزاد پوسته به جابه‌جایی زاویه‌ای تقریبی 270 درجه رسیده است (شکل c-8). با توجه به شکل 16 ملاحظه می‌گردد که در تمامی سرعت‌ها میزان جابه‌جایی پوسته تا قبل از ثابت شدن نیروی وارونگی تقریباً یکسان بوده و جابه‌جایی نهایی تنها به مقدار سرعت پرتابه بستگی دارد به طوری که با افزایش سرعت پرتابه، این مقدار نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش انرژی جنبشی پرتابه و در نتیجه جذب انرژی بیشتر توسط پوسته می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار نیروی ثابت دینامیکی با افزایش سرعت پرتابه تغییر چندانی نکرده و تقریباً ثابت می‌ماند. با توجه به شکل پوسته‌ها پس از وارونگی می‌توان مشاهده نمود که در میزان فرورفتگی پوسته در قالب تفاوتی بین نمونه‌های تجربی و مدل‌های شبیه‌سازی شده دیده می‌شود. علت این تفاوت را می‌توان در دو مورد ذکر نمود. اول این‌که با توجه به جدول 2 مشاهده می‌شود که مقادیر تجربی ضخامت از مقادیر عددی آن بیشترند. این مساله موجب می‌شود که انرژی جنبشی پرتابه در حالت عددی، بیشتر از آن‌که صرف افزایش ضخامت پوسته گردد، منجر به فرورفتگی بیشتر آن در قالب شود. علت دوم با توجه به شکل تغییر یافته پوسته‌ها می‌تواند چروک‌خوردگی کمتر دیواره پوسته در حالت مدل‌سازی شده باشد که باعث می‌شود انرژی جنبشی پرتابه به جای ایجاد چروک بر دیواره پوسته، صرف فرورفتگی بیشتر پوسته در قالب شود.

شکل 17-a منحنی تغییرات انرژی جذب شده برحسب جابه‌جایی پوسته را به ازای پرتابه‌ای با سرعت 104 متر بر ثانیه در دو مدل تجربی و عددی نشان داده و آن‌ها را باهم مقایسه می‌نماید. همان‌طور که پیداست مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس توانسته است انرژی جذب شده توسط پوسته را در طول فرآیند با دقت خوبی پیش‌بینی نماید. شکل‌های 17-b و 17-c نیز تغییرات انرژی جذب شده برحسب جابه‌جایی پوسته را به ازای پرتابه‌ای با سرعت‌های 89، 104 و 126.5 متر بر ثانیه به ترتیب در حالت‌های تجربی و عددی نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که هم در حالت تجربی و

#### 4-2- اثر جرم پرتابه بر فرآیند وارونگی داخلی

در این قسمت تاثیر جرم پرتابه بر فرآیند وارونگی داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج تجربی و عددی بدست آمده با یکدیگر مقایسه می‌گردند. بدین منظور پرتابه با سرعت ثابت 89 متر بر ثانیه و جرم‌های 175، 264 و 475 گرم (مطابق با جدول 3) به سمت پوسته شلیک می‌شود. شکل 18 نمای برش خورده از سه نمونه را که به ترتیب از راست به چپ تحت ضربه پرتابه‌ای به جرم‌های 175، 264 و 475 گرم قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. مقادیر کوتاه-شدگی و انرژی جذب شده توسط پوسته‌ها در جدول 3 آورده شده است. سپس منحنی‌های نیرو-زمان بدست آمده از تست‌های تجربی و نرم‌افزار آباکوس برای جرم‌های 175 و 475 گرم جداگانه در شکل‌های 19 و 20 با یکدیگر مقایسه می‌شوند. با توجه به شکل پوسته‌ها پس از وارونگی مشاهده می‌شود که در صورت ثابت ماندن سرعت پرتابه، افزایش جرم آن احتمال ایجاد چروک بر لایه بیرونی پوسته را بیشتر می‌نماید. به عبارت دیگر اگر سرعت اعمال ضربه تغییری نکند، با افزایش جرم پرتابه، انرژی جنبشی آن از یک جابه‌جایی معین به بعد دیگر صرف فرورفتگی پوسته در قالب نمی‌گردد بلکه منجر به ایجاد چروک بر سطح بیرونی پوسته می‌شود. همان‌طور که از نمودار نیرو-زمان در شکل 20 مشاهده می‌شود، نیروی وارونگی پس از ثابت شدن مجدداً در قسمت انتهایی نمودار افزایش می‌یابد که این پدیده در حالت تجربی کاملاً قابل مشاهده می‌باشد. علت این افزایش ناگهانی نیرو ایجاد چروک بر لایه بیرونی پوسته است و چون میزان این چروک در حالت تجربی بیشتر از حالت عددی مشاهده شده لذا انتظار می‌رود که افزایش نیرو در قسمت انتهایی نمودار در حالت تجربی بیشتر از حالت عددی باشد. شکل 21 نیز منحنی‌های نیرو-زمان بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی و شبیه-سازی‌های عددی را به ازای پرتابه‌ای با جرم‌های 175، 264 و 475 گرم و سرعت یکسان 89 متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که پدیده افزایش جرم پرتابه به ازای یک سرعت معین منجر به افزایش نیروی ثابت دینامیکی شده است. این مساله هم در نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و هم در نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی قابل مشاهده است. همچنین

جدول 3 مقادیر تجربی و عددی کوتاه‌شدگی و انرژی جذب شده توسط پوسته‌ها در فرآیند وارونگی داخلی (سرعت پرتابه 89 متر بر ثانیه).

جرم (gr)	کوتاه‌شدگی پوسته‌ها (mm)		انرژی جذب شده (J)	
	تجربی	رابطه (2) عددی	تجربی	عددی
175	13	15.05	693.07	663.17
264	17	18.23	1029.72	1030.11
475	30	31.12	1881.24	1817.08



Fig. 18 Internally inverted sectioned tubes for the impact velocity of 89 m/s, (respectively from right to left,  $m=175, 264$  & 475 gr)

شکل 18 نمایی برش خورده از لوله‌های وارونه شده تحت ضربه‌ای با سرعت 89 متر بر ثانیه، (به ترتیب از راست به چپ جرم پرتابه برابر است با 175، 264 و 475 گرم)

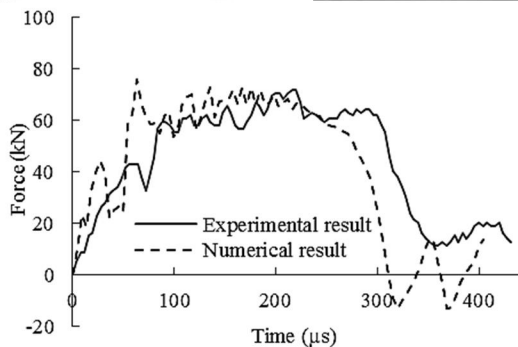
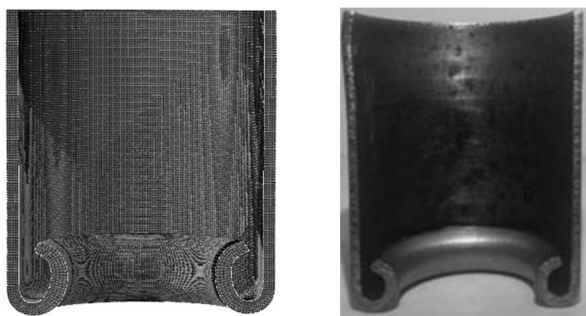


Fig. 19 Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $v=89\text{m/s}$ ,  $m=175\text{gr}$

شکل 19 منحنی‌های نیرو-زمان و شکل نهایی لوله‌ها بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای سرعت پرتابه 89 متر بر ثانیه و جرم پرتابه 175 گرم

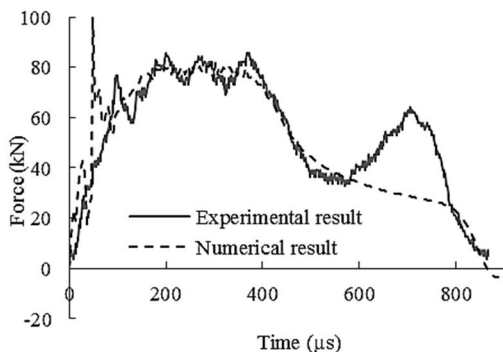
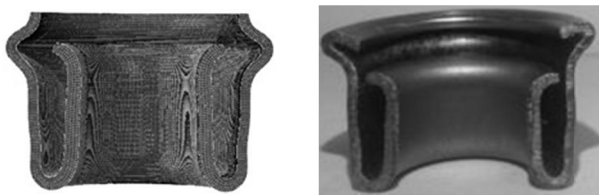
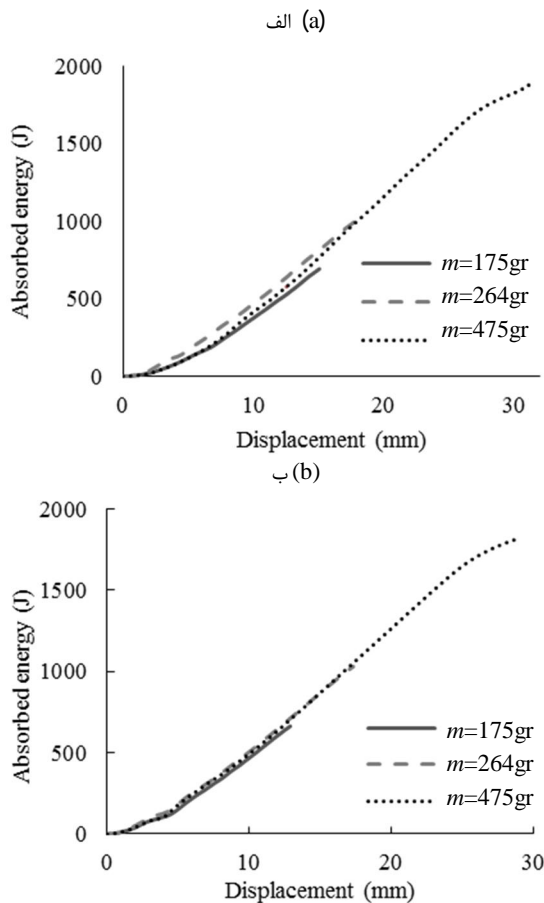


Fig. 20 Force-time curves and final shape of the tubes after deformation in both numerical and experimental models for  $v=89\text{m/s}$ ,  $m=475\text{gr}$

شکل 20 منحنی‌های نیرو-زمان و شکل نهایی لوله‌ها بعد از تغییر شکل در حالت‌های عددی و تجربی برای سرعت پرتابه 89 متر بر ثانیه و جرم پرتابه 475 گرم منحنی‌های انرژی جذب شده برحسب جابه‌جایی نیز به ازای جرم‌های مختلف ضربه‌زننده در حالت‌های تجربی و عددی در شکل 22 نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که هم در حالت تجربی و هم در حالت عددی شیب منحنی-های بدست آمده برای هر سه جرم تقریباً با یکدیگر برابرند. لذا در این قسمت نیز می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در صورت ثابت ماندن شرایط هندسی و سرعت پرتابه، پوسته برای وارونه شدن به یک مقدار معینی انرژی نیاز دارد به طوری‌که افزایش جرم پرتابه منجر به جذب انرژی بیشتر و در نتیجه افزایش جابه‌جایی پوسته می‌گردد.





**Fig. 22** Comparison of absorbed energy- displacement curves for the impact velocity of 89 m/s and the striking mass of 175, 264 & 475 gr, (a) experimental model, (b) numerical model

شکل 22 مقایسه منحنی‌های انرژی جذب شده-جابجایی تحت ضربه پرتابه‌ای با سرعت 89 متر بر ثانیه و جرم‌های 175، 264 و 475 گرم، (الف) مدل تجربی، (ب) مدل عددی

- با فرض ثابت ماندن سرعت پرتابه و شرایط هندسی پوسته و قالب، ملاحظه شده که به مقدار معینی انرژی برای وارونگی پوسته نیاز است و هرچقدر جرم پرتابه افزایش یابد، انرژی جنبشی مازاد منجر به جابه‌جایی بیشتر پوسته می‌گردد.

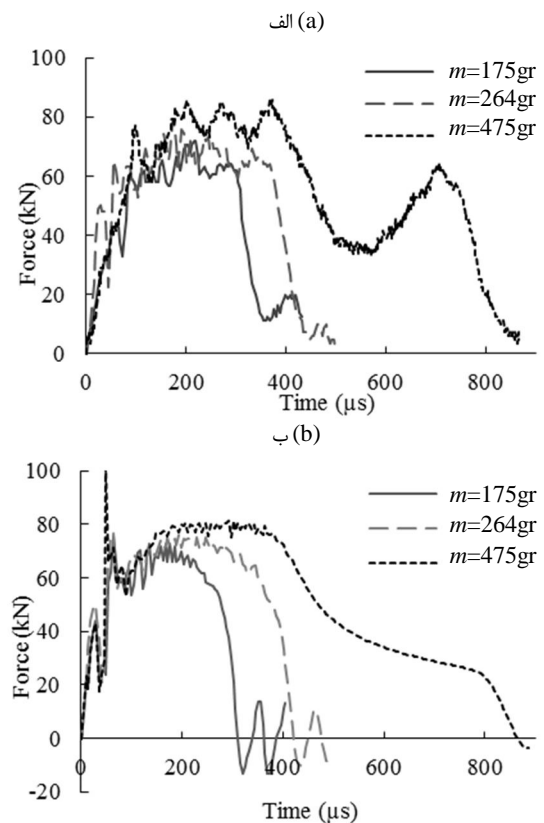
- نتایج عددی و نتایج تجربی در اکثر موارد تطابق خوبی با یکدیگر دارند، لذا می‌توان از نتایج عددی به خوبی استفاده نمود.

#### 6- فهرست علائم

$m$	جرم پرتابه
$v$	سرعت پرتابه
$Y_d$	تنش تسلیم دینامیکی
$Y_s$	تنش تسلیم استاتیکی
$\varepsilon$	نرخ کرنش

#### 7- مراجع

- [1] A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, A. Meshkinzar, Effect of low density, low strength polyurethane foam on the energy absorption characteristics of circumferentially grooved thick-walled circular tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 71, No. 10, pp. 81–90, 2013.
- [2] A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, A. Meshkinzar, Analytical and experimental investigations into the controlled energy



**Fig. 21** Comparison of force-displacement curves for the impact velocity of 89 m/s and the striking masses of 175, 264 & 475 gr, (a) experimental model, (b) numerical model

شکل 21 مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی تحت ضربه پرتابه‌ای با سرعت 89 متر بر ثانیه و جرم‌های 175، 264 و 475 گرم، (الف) مدل تجربی، (ب) مدل عددی

#### 5- نتیجه گیری

در این مقاله مطالعات تجربی و عددی بر روی فرآیند وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای فلزی با استفاده از قالب تحت ضربه محوری انجام شده است و میزان تغییر شکل و انرژی جذب شده توسط پوسته‌ها تحت شرایط مختلف ضربه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور شرایط هندسی پوسته و قالب ثابت در نظر گرفته شده و اثر پارامترهای موثر بر ضربه که شامل سرعت و جرم پرتابه می‌باشد، بر رفتار تغییر شکل وارونگی داخلی پوسته‌های استوانه‌ای لحاظ گردیده است. با توجه به نتایج بدست آمده از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان موارد ذیل را بیان نمود:

- اگر جرم پرتابه ثابت در نظر گرفته شود، مقدار نیروی ثابت دینامیکی با افزایش سرعت پرتابه تغییر چندانی ننموده و تنها مقدار جابه‌جایی نهایی پوسته افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش انرژی جنبشی پرتابه و در نتیجه جذب انرژی بیشتر توسط پوسته می‌باشد. همچنین افزایش سرعت در این شرایط به تدریج باعث ایجاد چروک بر لایه بیرونی پوسته می‌شود.

- با فرض ثابت ماندن جرم پرتابه و شرایط هندسی پوسته و قالب، ملاحظه شده است که پوسته برای وارونه شدن به مقدار معینی انرژی نیاز دارد و هرچقدر سرعت پرتابه افزایش یابد، انرژی جنبشی باقی‌مانده باعث جابه‌جایی بیشتر پوسته می‌گردد.

- افزایش جرم پرتابه به ازای یک سرعت معین، علاوه بر افزایش جابه‌جایی پوسته، منجر به افزایش نیروی ثابت وارونگی می‌شود. همچنین افزایش جرم در این حالت منجر به ایجاد چروک بر دیواره پوسته می‌گردد.

- [9] P. A. Rosa, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins, Internal inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 7, pp. 775-784, 2004.
- [10] P. A. R. Rosa, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins, External inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 8, pp. 787-796, 2003.
- [11] A. S. Hoseyni, P. Hoseyni Tehrani, Simulation external inversion for buffer train under impact by using software LS-DYNA, *Proceedings of The 20th Annual International Iranian Mechanical Engineering Conference*, Shiraz, Iran, May 16-18, 2012. (in Persian فارسی)
- [12] A. Niknejad, M. Moeinifard, Theoretical and experimental studies of the external inversion process in the circular metal tubes, *Materials and Design*, Vol. 40, No. 9, pp. 324-330, 2012.
- [13] N. Jones, *Structural impact*, Second Edition, pp. 340-341, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [14] H. Kobayashi, K. Horikawa, K. Ogawa, M. Hori, Impact deformation of thin-walled circular tube filled with aluminum foam in lateral compression, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 64-71, 2009.
- absorption characteristics of thick-walled tubes with circumferential groove, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 10, pp. 4199-4212, 2014.
- [3] A. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Sohrabi, Experimental and numerical study of conical thin shells collapse under dynamic axial loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 392-402, 2015. (in Persian فارسی)
- [4] A. Nadaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Pakian Booshehri, Numerical and experimental study of a diamond collapse of a thin wall tube energy-absorber with caps under dynamic axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 169-178, 2015. (in Persian فارسی)
- [5] L. R. Guist, D. P. Marble, *Prediction of the inversion load of a circular tube*, NASA Technical Note, TN-D-3622, 1966.
- [6] S. T. S. Al-Hassani, W. Johnson, W. T. Lowe, Characteristics of inversion tubes under axial loading, *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 37-81, 1972.
- [7] T. Y. Reddy, Guist and Marble revisited-on the natural knuckle radius in tube inversion, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 34, No. 10, pp. 761-768, 1992.
- [8] S. R. Reid, J. J. Harrigan, Transient effects in the quasi-static and dynamic internal inversion and nosing of metal tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, No. 2, pp. 263-280, 1998.